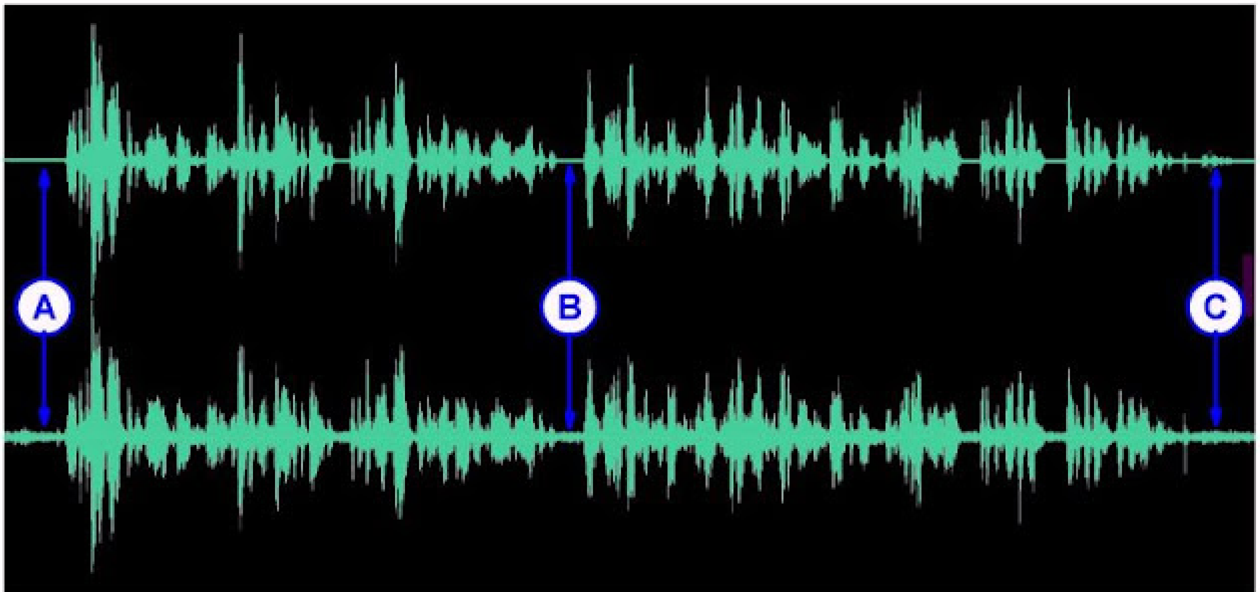
Ruis in de elektronica

Ruis is een meestal ongewenst signaal waar iedere elektronicus mee te maken heeft en waarmee hij of zij moet leven. Er bestaan diverse soorten en bovendien zelfs 'kleuren' ruis. Een interessante zoektocht naar dit verschijnsel leverde onderstaand artikel op.

Auteur: Jos Verstraten, Landgraaf, Nederland
Email: josverstraten@live.nl
Publicatiedatum: 22-07-2022

Kennismaking met het begrip ruis

Wat is ruis?
Het woord '*ruis*' is een algemeen begrip voor een aantal natuurkundige en elektrische verschijnselen die echter allemaal hetzelfde gevolg hebben. Elektronische ruis is een in de meeste gevallen zeer ongewenst signaal dat aanwezig is op alle punten van een schakeling waardoor elektrische stromen lopen of waarop elektrische spanningen aanwezig zijn. Dat ruissignaal mengt zich met het nuttige signaal dat u door een schakeling wilt sturen en zal dus op een storende manier aanwezig zijn op het uitgangssignaal van die schakeling. In de onderstaande oscillogrammen ziet u bijvoorbeeld een audiosignaal zonder (boven) en met (onder) ruis. Als het ruisvrije signaal 0 V is (punten A en B) ziet u het best de aanwezigheid van de ruis. Ruis kan er zelfs voor zorgen dat kleine signalen volledig worden 'overspoeld' door het ruissignaal (punt C). U hoort dan niets meer van het originele signaal, maar hoort uitsluitend de ruis.



Een audiosignaal met en zonder ruis. (© Mediaprocessing)

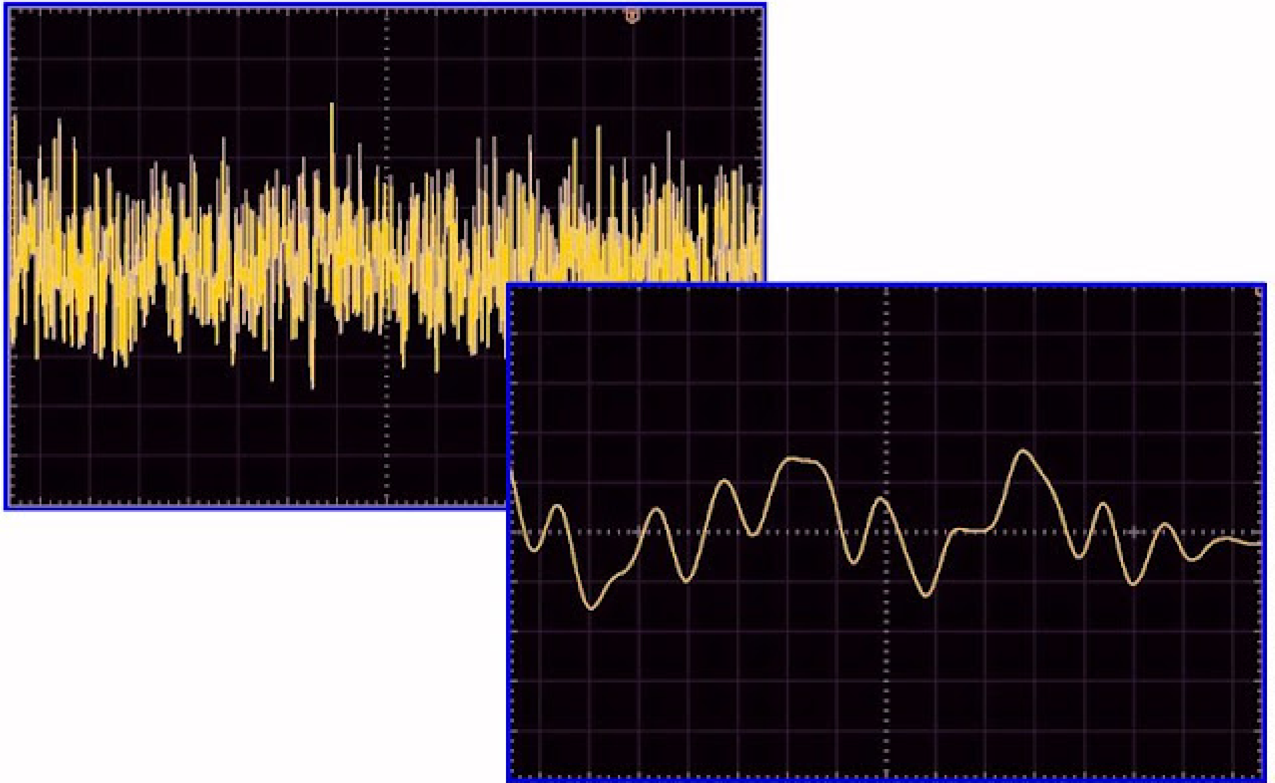
Als u een bepaalde leeftijd hebt bereikt en dus nog naar analoge TV hebt gekeken kent u natuurlijk het in die tijd overbekende beeld met alleen ruis als u afstemde op een zender die uit de lucht was. De grijze stipjes die het scherm vulden waren allemaal het gevolg van ruis die via de antenne-ingang binnenkwam en door de versterkers in de TV werd versterkt.



Het bekende ruisbeeld bij een oude analoge TV. (© Ziggo)

De primaire bronnen van ruis
Aan de twee behandelde voorbeelden van ruis kunt u de twee fundamentele bronnen van ruis afleiden. Ruis kan ontstaan als een ruisspanning in een elektronische schakeling. Het voorbeeld van het verruiste audiosignaal is daar een typisch voorbeeld van. Ruis kan echter ook primair ontstaan onder de vorm van elektromagnetische straling die in de ruimte om ons heen aanwezig is. Die elektromagnetische ruis wordt door een elektrische geleider die als 'antenne' dienst doet omgezet in een ruisspanning. De ruis op het scherm van een oude analoge TV is daar een typische voorbeeld van.

Een onvoorspelbare amplitude
Met '*amplitude*' wordt de grootte van een elektrisch signaal bedoelt op één welbepaald moment. Ruis is altijd aanwezig onder de vorm van een wisselspanningssignaal met een geheel willekeurig fluctuerende amplitude. Dat betekent dat het absoluut onmogelijk is om te voorspellen of te berekenen hoe groot een ruissignaal op een bepaald moment zal zijn. Op het ene moment kan een ruissignaal 0,1 mV groot zijn, een milliseconde later kan het 2,3 mV groot zijn. Ruis is dus geen periodiek signaal. U kunt geen periode in een ruissignaal ontdekken die zich eindeloos herhaalt.
Dat blijkt heel duidelijk als u een ruissignaal observeert op het scherm van uw oscilloscoop. In het onderstaand oscillogram kunt u geen zichzelf herhalende signaalfragmenten ontdekken. Het verloop van het signaal is écht volledig onvoorspelbaar. Als u het beeld uitrekt door de tijdbasis van de scope op een snellere stand in te stellen ziet u heel duidelijk hoe willekeurig de toppen van het signaal zijn in functie van de tijd.



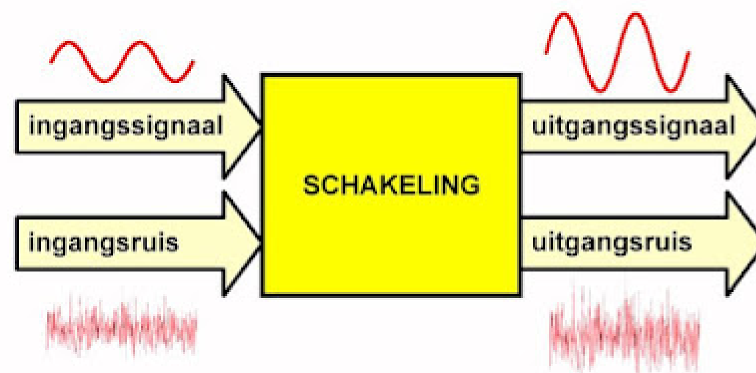
Een ruissignaal op het scherm van een oscilloscoop. (© 2022 Jos Verstraten)

Een zeer grote bandbreedte
Uit het bovenstaande oscillogram kunt u nog een tweede eigenschap van ruis afleiden. U ziet duidelijk dat ruis niet alleen een niet te voorspellen amplitude heeft, maar ook een niet te voorspellen frequentie. Een smalle periode (hoge frequentie) kan opgevolgd worden door een veel bredere periode (lage frequentie), die op haar beurt weer opgevolgd wordt door een zeer smalle periode.
Men zegt dan ook dat een ruissignaal een zeer grote bandbreedte heeft. Zuiver theoretisch bekeken zitten er dus in ruis signalen met frequenties van 0 Hz tot signalen met een vrijwel oneindig hoge frequentie. Hoe het in het signaal beschikbare vermogen is verdeeld over het in de praktijk beschikbare frequentiegebied bepaalt de '*kleur*' van de ruis. Daar komen wij later in dit verhaal uitgebreid op terug.

De signaal/ruis-verhouding SNR
In het Engels heeft men het over de '*Signal to Noise Ratio*'. De SNR geeft de verhouding weer tussen het vermogen van het gewenste signaal en het vermogen van de op het signaal aanwezige ruis.
De SNR is dus een quotiënt van twee identieke grootheden en heeft bijgevolg geen eenheid. Het is gewoon een getal:
$SNR = P_{signaal} / P_{ruis}$
Omdat het signaalvermogen in de meeste gevallen meerdere ordes van grootte groter is dan het ruisvermogen, wordt de signaal/ruis-verhouding vaak weergegeven op een logaritmische schaal. Hiervoor wordt de pseudo-eenheid decibel (dB) gebruikt:
$SNR_{dB} = 10 \cdot \log_{10}[P_{signaal} / P_{ruis}]$ (dB)
Omdat in de audiotechniek zelden met signaalvermogens, maar meestal met signaalspanningen wordt gewerkt, wordt de formule omgewerkt naar de verhouding van de gemiddelde signaalspanning tot de gemiddelde ruisspanning. Tussen het vermogen en de spanning bestaat een kwadratisch verband:
$P = U^2 / R$
Vandaar dat de in dB uitgedrukte formule voor de signaal/ruis-verhouding tussen de effectieve spanningen gelijk wordt aan:
$SNR = 20 \cdot \log_{10}[U_{signaal} / U_{ruis}]$ (dB)
Om de verstaanbaarheid bij telefonie te waarborgen is internationaal afgesproken te streven

naar een SNR aan het einde van een telefoonverbinding van ongeveer een factor 30. Deze factor 30 komt overeen met een SNR van ongeveer 15 dB.
Bij audioversterkers geldt dat bij een signaal/ruis-verhouding van 60 dB de ruis nog zeer zacht te horen is. Een signaal/ruis-verhouding van 90 dB is zeer goed.

Het ruisgetal of Noise Figure (NF)
Ruis kan aanwezig zijn op een signaal, maar kan ook worden geïntroduceerd in een elektronische schakeling. Om deze invloed te definiëren wordt gebruik gemaakt van het begrip '*ruisgetal*'. Het ruisgetal is een eenheidsloos getal NF dat de verhouding geeft tussen de SNR van het ingangssignaal en de SNR van het uitgangssignaal van een bepaalde elektronische schakeling:
$SNR_{ingang} = NF \cdot SNR_{uitgang}$
De elektronische schakeling voegt altijd ruis toe aan het ingangssignaal, zodat de ruis aan de uitgang altijd groter zal zijn dan de ruis aan de ingang. De SNR aan de uitgang is dus steeds kleiner dan de SNR aan de ingang. Vandaar dat het getal NF per definitie groter moet zijn dan een. Het ruisgetal kan ook in dB worden uitgedrukt:
$NF_{dB} = 10 \cdot \log NF$



De grootheid 'ruisgetal' toegelicht. (© 2022 Jos Verstraten)

Soorten ruis
Ruis heeft diverse bronnen, men onderscheidt:
- Thermische ruis (Johnson-Nyquist ruis)
- Atmosferische ruis
- Galactische ruis
- Hagelruis
- Door de mens gemaakte ruis
- Kwantiseringsruis
- Transistor ruis
- Partitie ruis
- Burst ruis
- Flikker ruis
- Transittijd ruis

Deze diverse ruisbronnen komen in de rest van dit artikel aan de orde.

Kleur van ruis
Aan licht worden bepaalde kleuren toegekend, afhankelijk van de golflengte van de elektromagnetische straling van het licht. Op dezelfde manier worden aan ruis bepaalde kleuren toegekend, afhankelijk van de frequentiesamenstelling van de ruis.
Men onderscheidt:
- Witte ruis
- Rose ruis
- Bruine
- Blauwe ruis
- Paarse ruis

- Grijze ruis

Ook die begrippen worden verder in dit artikel uiteraard besproken.

Thermische ruis (thermal noise, Johnson-Nyquist noise)

Historie

Dit type ruis werd in 1926 ontdekt door John B. Johnson. Het was echter Harry Nyquist die in staat was dit verschijnsel wiskundig te berekenen.

Alles beweegt en trilt...

Zoals u weet bestaat de materie uit atomen, opgebouwd uit een kern met daar omheen cirkelende elektronen. Door de warmte gaan die elektronen trillen, waardoor zij gemakkelijk van het ene naar het andere atoom kunnen overspringen. Deze volledig willekeurige bewegingen zorgen ervoor dat in een geleider tijdelijk en plaatselijk een elektronenoverschot kan ontstaan. Een fractie van een seconde later kan dit overschot weer zijn opgelost. Deze elektronenbewegingen veroorzaken zeer kleine spanningsverschillen tussen de uiteinden van de geleider. Dat noemt men de thermische ruis.

De bandbreedte

Thermische ruis is van zichzelf zeer breedbandig. In de praktijk zal dus uitsluitend de bandbreedte van de toegepaste schakelingen de bandbreedte van deze ruis beperken.

De ruisenergie, het ruisvermogen en de ruisspanning

De energie die in deze ruis zit is recht evenredig met de temperatuur en wordt gegeven door de formule:

$E_{ruis} = k \cdot T$ (joule)

In deze formule staat k voor de constante van Bolzman, gelijk aan:

$k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ J/K (joule per graad kelvin)

Het vermogen dat in deze ruis aanwezig is wordt gegeven door:

$P_{ruis} = k \cdot T \cdot B$ (watt)

In deze formule staat B voor de bandbreedte van het signaal in Hz.

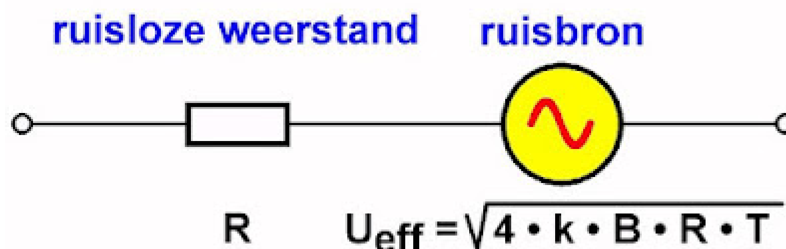
Vanwege het reeds genoemde kwadratisch verband tussen het vermogen en de spanning:

$P_{ruis} = U_{ruis}^2 / R$

kunt u de effectieve waarde van de ruisspanning berekenen met:

$U_{ruis} = \sqrt{(4 \cdot k \cdot B \cdot R \cdot T)}$

In deze formule staat R voor de weerstand waarin de ruisspanning ontstaat. U kunt deze ruisspanning voorstellen als een wisselspanningsbron, die in serie staat met de betreffende ruisloze weerstand.



Een schematische voorstelling van de thermische ruis over een weerstand.
(© 2022 Jos Verstraten)

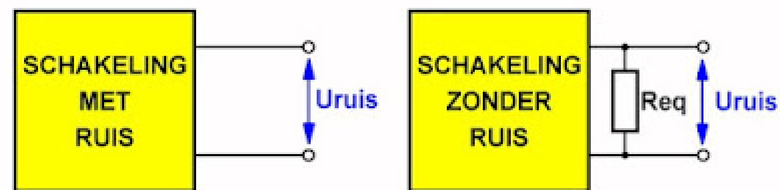
De theoretisch minimale waarde van de thermische ruisspanning

Aan de thermische ruisspanning is niet te ontkomen. Alleen als de temperatuur (in graden kelvin) nul is, is ook de spanning U_{ruis} nul. Dat is een situatie die uiteraard nooit voorkomt en de thermische ruis is dus een gegeven waarmee u moet leren leven. Om u een idee te geven

over de grootte: de thermische ruisspanning bedraagt ongeveer 1,8 µV bij een kamertemperatuur van 20 °C (193 °K), over een weerstand van 10 kΩ en gemeten met een bandbreedte van 20 kHz.

De equivalente ruisweerstand

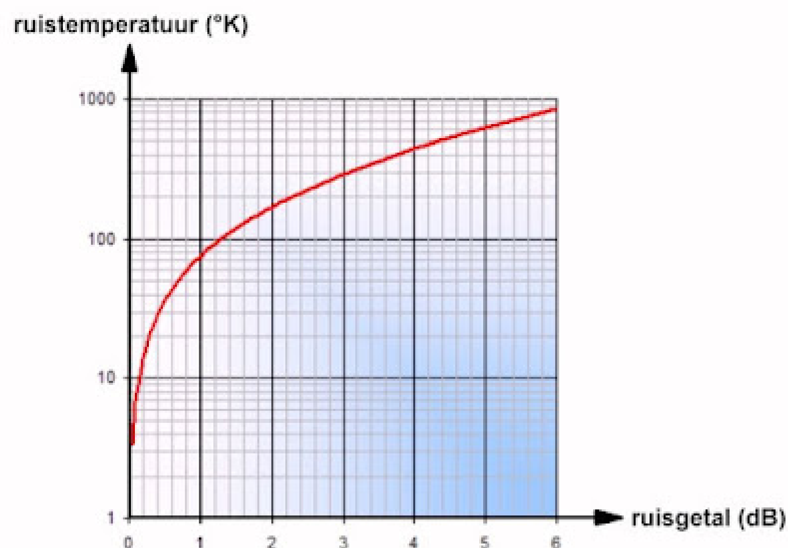
Het ontstaan van een ruisspanning over een weerstand onder de invloed van de temperatuur was een van de eerste soorten ruis die men goed kon verklaren. Vandaar dat men de behoefte voelde om alle soorten ruis te herleiden tot een ruisende weerstand. Dit noemt men de '*equivalente ruisweerstand*' van een systeem. In de onderstaande figuur wordt dit voorgesteld. Links staat een schakeling die een bepaalde hoeveelheid ruis van onbekende oorsprong genereert. Rechts wordt dezelfde schakeling voorgesteld als volledig ruisvrij, maar afgesloten met een weerstand R_{eq} met een waarde die volgens de bovenstaande formule even veel ruis produceert als de linker schakeling. De waarde van R_{eq} is dan de '*equivalente ruisweerstand*' van de linker schakeling.



Het begrip 'equivalente ruisweerstand'. (© 2022 Jos Verstraten)

De ruistemperatuur

Omdat de thermische ruis die in een weerstand wordt gegenereerd ook afhankelijk is van de temperatuur van de weerstand heeft men nog een andere manier verzonnen om de grootte van de ruis te definiëren: de '*ruistemperatuur*'. Het wiskundig verklaren van deze grootheid vereist nogal wat mathematisch inzicht en dat gaan wij in dit artikel dan ook niet doen. Met woorden valt de definitie van dit begrip echter gemakkelijk uit te leggen. De ruistemperatuur van een systeem of component dat ruis opwerkt is gelijk aan de temperatuur die een weerstand moet hebben om net zo veel ruis te produceren. Wij volstaan met de publicatie van de onderstaande grafiek, waarin het verband tussen deze ruistemperatuur en het ruisgetal (in dB) is gegeven.



Het verband tussen de temperatuur van thermische ruis en het ruisgetal. (© 2022 Jos Verstraten)

Atmosferische ruis (atmospheric noise, static noise)

Ontstaan
Deze ruis ontstaat in de atmosfeer die onze planeet aarde omgeeft. De voornaamste bron van atmosferische ruis is de bliksem. Door iedere bliksem die in de atmosfeer ontstaat wordt een elektromagnetisch veld opgewekt dat in iedere elektrische geleider een inductiespanning genereert. Omdat elektromagnetische velden zich tot ver in de omgeving kunnen verspreiden wordt deze ruis niet alleen veroorzaakt door bliksemschichten in de naaste omgeving, maar door de optelsom van alle bliksems in de verre omtrek. Het gaat hierbij bovendien zowel over bliksemontladingen tussen de wolken onderling en als tussen de wolken en de aarde. Dat zijn er veel meer dan u waarschijnlijk denkt! Over de hele wereld vinden er elke dag miljoenen bliksemontladingen plaats. Die miljoenen inslagen per dag betekenen ongeveer 100 inslagen per seconde. De elektromagnetische energie van die inslagen komt via een heleboel wegen naar u toe. Dit verschijnsel heet dispersie en ontstaat bij alle voortplantingsverschijnselen van golven, ook bij licht. Onweer op grotere afstanden ontvangt u dus niet als een impuls maar als een constante achtergrond ruis.
Ook zogenoemde '*corona-ontladingen*' hoog in de atmosfeer dragen bij aan de atmosferische ruis.

De bandbreedte
Atmosferische ruis is nier erg breedbandig en zit voornamelijk in de lagere frequentiegebieden tot 20 MHz. In de onderstaande grafiek ziet u hoe deze ruisenergie zit verspreid over de frequentie-as.



De frequentie-verdeling van de energie van atmosferische ruis. (© 2022 Jos Verstraten)

Galactische ruis (cosmic noise, solar noise)

Ontstaan van galactische ruis
Galactische ruis is afkomstig uit de ruimte en heeft een heleboel bronnen. Alle sterren, dus ook de zon, zenden allerlei vormen van elektromagnetische straling en elektrisch geladen deeltjes naar de aarde. Die komen allemaal in antennes en in lange elektrische leidingen terecht en wekken daarin ruisspanningen op.
Een belangrijk deel van deze ruis wordt veroorzaakt door de zogenaamde '*Cherenkov-straling*'. In de hogere lagen (10 km en hoger) van de aardatmosfeer worden hoogenergetische deeltjes geactiveerd door extreem hoogenergetische gammastraling van sterrenstelsels en supernova's. Deze deeltjes activeren bij hun reis naar het aardoppervlak een regen van secundaire elektrisch geladen deeltjes met hoge energie, die lichtflitsen veroorzaken in de bovenste atmosfeer. Deze Cherenkov-straling is alleen waar te nemen vanuit de ruimte of met speciale Cherenkov-telescopen vanaf het aardoppervlak.

De bandbreedte van galactische ruis
Galactische ruis heeft een grote bandbreedte tot meer dan 100 MHz, maar is veel zwakker dan de atmosferische ruis.



De frequentie-verdeling van de energie van galactische ruis. (© 2022 Jos Verstraten)

Hagelruis (shot noise)

De ontdekking van hagelruis
Hagelruis werd voor het eerst beschreven in 1918 door Walter Schottky toe hij onverklaarbare stroomvariaties in elektronenbuizen bestudeerde.

Hagelruis is een kwantummechanisch proces
Het verschijnsel is niet te verklaren met de klassieke mechanica. In die mechanica is het vloeien van stroom een continu proces. Als er een potentiaalverschil ontstaat tussen twee punten zal er een vloed van elektronen op gang komen die van het ene punt naar het andere punt door de geleider stroomt. Dat wordt wel eens vergeleken met het met een constante snelheid stromen van water door een rivier.
Dank zij de kwantummechanica weten wij tegenwoordig dat dit een foutieve interpretatie is van de werkelijkheid. Het vrijkomen van een elektron uit een atoom is een statistisch proces, wij kunnen niet exact voorspellen wanneer het atoom een elektron uitstoot. Het kan dus gebeuren dat er op tijdstip t1 een hoeveelheid n elektronen worden uitgestoten en even later op tijdstip t2 slechts m elektronen. Bekeken op macroscopische schaal met uw meetinstrumenten lijkt het weliswaar of er een constante hoeveelheid elektronen stroomt. Op microscopische schaal, echter, zal de hoeveelheid elektronen die door de geleider stroomt van moment tot moment verschillen. Dit verschijnsel genereert de schijnbaar onverklaarbare stroomvariaties in buizen en halfgeleiders en wordt '*hagelruis*' genoemd.

De grootte van hagelruis
In de praktijk zal hagelruis maar een onbeduidend deel uitmaken van het totale ruisverschijnsel in een '*normale*' elektronische schakeling. Een stroom van 1 A ontstaat als er ongeveer $6{,}24 \cdot 10^{18}$ elektronen per seconde door een geleider vloeien. Zelfs als door kwantummechanische effecten dat aantal met een paar miljard per seconde varieert zal dit een nauwelijks waarneembaar effect hebben op de constantheid van de stroom. Hagelruis is echter volledig onafhankelijk van de temperatuur en de bandbreedte. In zeer speciale zeer gevoelige schakelingen die flink worden gekoeld om de thermische ruis te minimaliseren kan de hagelruis een dominante factor worden.

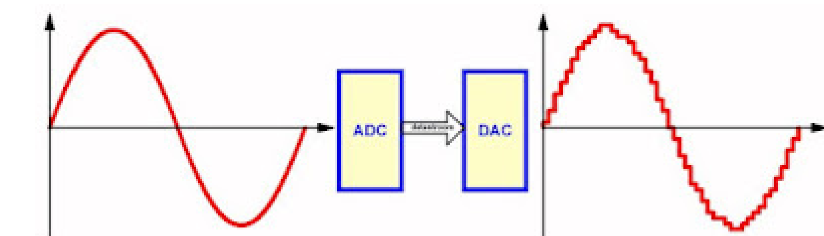
Door de mens gemaakte ruis (man-made noise)

Het ontstaan van deze ruis
Deze door de mens zélf geproduceerde ruis ontstaat tegenwoordig door werkelijk ontelbare bronnen die in ieder huis en in iedere straat aanwezig zijn. Daarbij moet u denken aan storingen van elektronisch gestuurde huishoudelijke apparaten, lichtdimmers, LED-lampen, netadapters met geschakelde voedingen, ontelbare elektronische apparaten met geschakelde voedingen, maar ook aan vonken veroorzaakt door trein en tram. Al deze storingssignalen kunnen alleen ruis veroorzaken als hun energie ook wordt uitgestraald door antennes. Aan antennes geen gebrek in een modern huis! Aan de meeste elektronische of elektrische apparaten zit wel een onafgeschermd netsnoer of een simpele verbinding met een andere apparaat. Deze kabels zijn perfecte antennes voor het frequentiebereik van die storingsbronnen.

Het frequentiebereik van man-made ruis
Man-made ruis kunt u aantreffen in het frequentiegebied van 0,1 MHz tot 4 MHz. Op een rustige landelijke locatie, ver van een drukke stad, is het aandeel van man-made ruis gemiddeld 50 dB sterker dan de natuurlijke ruis. Dit kan in een drukke stedelijke omgeving met nog eens 20 tot 30 dB toenemen.

Kwantiseringsruis (quantization noise)

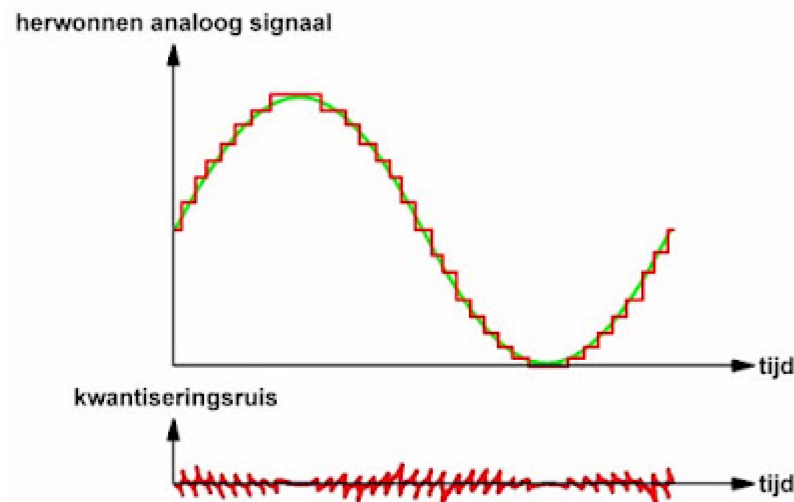
Het ontstaan van kwantiseringsruis
Een digitaal signaal is per definitie een signaal dat maar twee waarden kan aannemen: 'L' of 'H'. Het zal dus duidelijk zijn dat ook een combinatie van een aantal digitale signalen maar een beperkt aantal combinaties van 'L' en 'H' kan bevatten. Zet u een analoog signaal om in een digitale code, hoe ingewikkeld ook van samenstelling, dan zal die digitale code de momentane waarde van het analoog signaal alleen maar kunnen benaderen. Het oneindig aantal mogelijke waarden van het analoog signaal wordt in een eindig aantal digitale codecombinaties ondergebracht.
Dit verschil tussen analoge en digitale signaalverwerking is een van de belangrijkste eigenschappen van ADC- en DAC-systemen. Dat wordt samengevat met het begrip '*kwantiseringsbenadering*'. De uitgangscodes van een ADC zijn op ieder moment slechts een digitale benadering van het analoog ingangssignaal. Het zal dan ook wel duidelijk zijn dat, als deze benaderde codes weer via een DAC worden omgezet in het herwonnen analoog signaal, dit signaal ook een benadering zal zijn van het oorspronkelijke analoog signaal. Vandaar dat men zegt dat kwantisering altijd slechts een '*trapvormige benadering*' van het originele analoog signaal levert. In de onderstaande figuur is deze trapvormige benadering, voor de duidelijkheid nogal overdreven voorgesteld, goed te zien. Uiteraard werkt men in de praktijk met meer dan vier digitale signalen en met meer monsters per seconde.



Het ontstaan van kwantiseringsruis. (© 2022 Jos Verstraten)

De kwantiseringsruis
Tussen het originele analoog signaal en het herwonnen analoog signaal zal dus steeds een afwijking, een vervorming, bestaan. Deze vervorming kan wel geminimaliseerd worden, maar

geheel verdwijnen zal deze nooit. Analoge signalen, die via ADC + DAC systemen weer in analoge signalen worden omgezet, worden dus per definitie vervormd! Deze principe-gebonden vervorming wordt de '*kwantiseringsruis*' genoemd. Deze kwantiseringsruis is een van de belangrijkste specificaties van digitale signaalverwerkingssystemen. In de onderstaande figuur ziet u in de bovenste grafiek het originele analoog signaal (groen) en het herwonnen analoog signaal (rood). In de onderste grafiek is de ruis die op het bovenste signaal aanwezig is afzonderlijk voorgesteld.

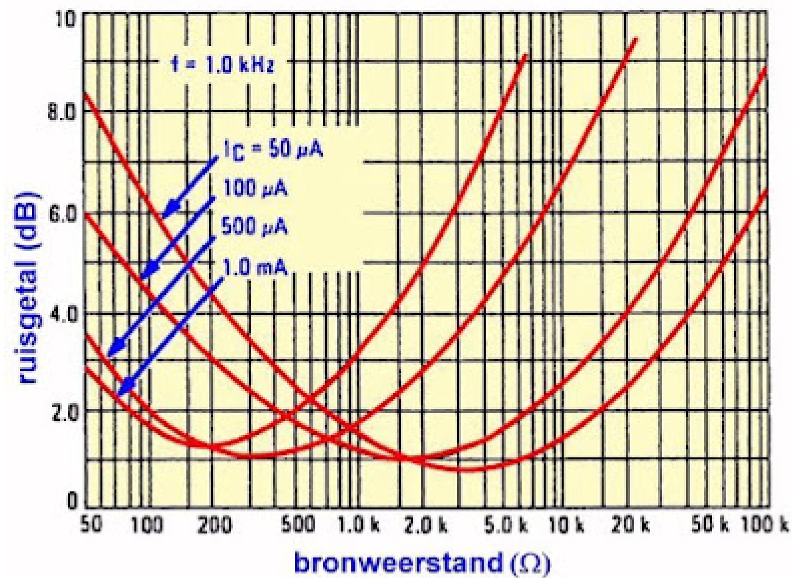


Een voorbeeld van kwantiseringsruis op een herwonnen analoog signaal.
(© 2022 Jos Verstraten)

Transistor ruis (semiconductor noise)

Collectorstroom en ruis

Transistoren produceren intern nogal wat ruis. Er bestaat een bepaald verband tussen de collectorstroom en de ruis die een transistor produceert. Dit verband wordt samengevat in een karakteristiek, zie onderstaande figuur, die bij de technische gegevens van vrijwel alle transistoren wordt opgenomen.
Uit deze karakteristiek blijkt duidelijk dat de geproduceerde ruis met een factor vier kan variëren in functie van de collectorstroom. Voor een op zich ruisarme transistor als een BC109 is, bij een bronimpedantie van 2 kΩ, de eigen ruis van de halfgeleider het laagst als u de collectorstroom instelt op ongeveer 100 µA. Zakt de bronimpedantie tot 200 Ω dan moet u ongeveer 1 mA door de collector sturen om zo min mogelijk transistorruis te krijgen.



Het verband tussen de bronimpedantie, de collectorstroom en de ruis van een transistor.
(© 2022 Jos Verstraten)

Ruis en bronimpedantie
Uit deze grafiek volgt overduidelijk dat de ruis flink toeneemt als de bronimpedantie erg laag wordt. Bepaalde bronnen, zoals de moving coil elementen van platendraaiers, hebben een impedantie van een paar ohm. Deze elementen werken magnetodynamisch. Het '*spoeltje*' bestaat uit een paar windingen geleidend materiaal uit een speciale metaallegering, dat aan de naald van het element is opgehangen. Het zal duidelijk zijn dat een dergelijk element een zeer lage impedantie heeft. Bovendien geeft een dergelijk element een zeer lage spanning af, 150 µV is geen uitzondering. U moet dus flink versterken, waardoor het probleem van de ruis van de eerste trap nog veel groter wordt. Die ruis wordt immers ook versterkt in de volgende trappen. Vanwege deze ruis kunt u dergelijke super-laagohmige en super-laagsignaal bronnen niet versterken met de standaard schakelingen. U moet dan overschakelen naar, bijvoorbeeld, parallel werkende versterkers.

Partitie ruis (partition noise)

Hoe ontstaat partitie ruis?
Partitie ruis ontstaat als een elektrische stroom zich kan verdelen tussen twee geleiders. Macroscopisch lijkt er niets aan de hand. Als een stroom van exact 1,00 A kan afvloeien via twee identieke weerstanden, dan zult u in beide kringen exact 0,50 A meten. Op microscopische schaal zullen er echter voortdurend elektronen die in feite het ene pad moeten volgen door allerlei externe invloeden op het andere pad terecht komen en vice versa. Dat de temperatuur hierbij een belangrijke rol speelt zal wel duidelijk zijn. En dat, naarmate de afmetingen van de geleiders kleiner worden en de stroomsterkten lager, er kwantummechanische effecten aan de orde komen zal ook wel duidelijk zijn.

Bekend verschijnsel uit het buizen tijdperk
Partitie ruis is een probleem bij schakelingen die gebruikt maken van penthode buizen. Bij dergelijke buizen verdeelt de kathodestroom zich immers tussen het schermrooster en de anode. Bovendien zijn de elektronen die door de kathode worden uitgestoten tamelijk '*opgewonden*', waardoor hun gedrag minder goed valt te voorspellen.

Burst ruis (burst noise, popcorn noise)

De ontdekking van burst ruis
Burst ruis werd voor het eerst waargenomen in de allereerste puntcontact diodes en werd grondig onderzocht toen bleek dat de allereerste geïntegreerde op-amp, de µA709, er veel last van had. Vanuit de wiskunde kan dit type ruis bestudeerd worden met een door de Rus Andrej Markov ontwikkelde Markovketen. Deze wiskunde beschrijft een systeem dat zich door een aantal toestanden beweegt en stapsgewijs overgangen vertoont van de ene naar de andere toestand.

Het ontstaan van burst ruis
Burst ruis ontstaat in de dunne lagen isolerende gate-oxiden die vaak in halfgeleiders worden aangetroffen (FET's) en die ook veelvuldig worden toegepast in de architectuur van chip's om geleiders van elkaar te scheiden. Men stelt vast dat in dergelijke lagen op onregelmatige en niet te voorspellen tijdstippen overgangen kunnen ontstaan van het ene naar het andere spanningsniveau. Deze '*stappen*' zijn slechts een paar honderd µV groot, maar zijn toch goed te detecteren als men weet waar men naar moet zoeken. In het onderstaand oscillogram is een dergelijke burst noise voorgesteld. Duidelijk blijkt dat het verschijnsel onregelmatig optreedt maar de twee spanningsniveaus altijd even groot zijn.


De burst ruis zichtbaar gemaakt. (© 2022 Jos Verstraten)

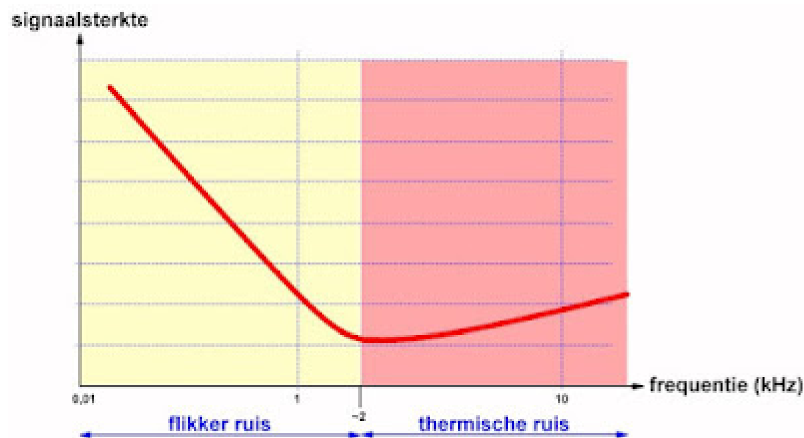
De oorzaak van burst ruis
Een van de voornaamste oorzaken van het ontstaan van deze ruis is de aanwezigheid van onzuiverheden in het materiaal waarmee de oxide-barriers worden gemaakt.

Popcorn noise
Burst ruis wordt soms ook '*popcorn noise*' genoemd naar het typische geluid, gelijkend op poffende mais, dat de ruis genereert in audioversterkers.

Flikker ruis (flicker noise, 1/f noise)

Wat is flikker ruis?
Flikker ruis, ook 1/f ruis genoemd, is een nog niet helemaal begrepen verschijnsel waar vrijwel alle elektronische componenten last van hebben. Het werd voor het eerst opgemerkt door Walter Schottky, die er in 1918 een artikel over schreef in de '*Annalen der Physik*'. De ruis treedt op vanaf het moment dat het onderdeel stroom gaat voeren. De amplitude van het ruissignaal neemt recht evenredig af naarmate men in een hogere frequentieband meet. Vandaar dat men deze ruis 1/f noemt, de amplitude van de ruis is immers omgekeerd evenredig met de frequentie.

Flikker ruis contra thermische ruis
In een laagfrequent systeem is de flikker ruis dominant bij de allerlaagste frequenties. Naarmate de onderzochte frequentieband stijgt daalt het aandeel van de flikker ruis tot bij een bepaalde frequentie f_c de thermische ruis dominant wordt. De waarde van f_c ligt bij bipolaire transistoren en JFET's rond 2 kHz.



De overgang van flikker naar thermische ruis. (© 2022 Jos Verstraten)

Recht evenredig met de stroom
De amplitude van de ruis stijgt recht evenredig met de grootte van de stroom die men door het onderdeel stuurt.

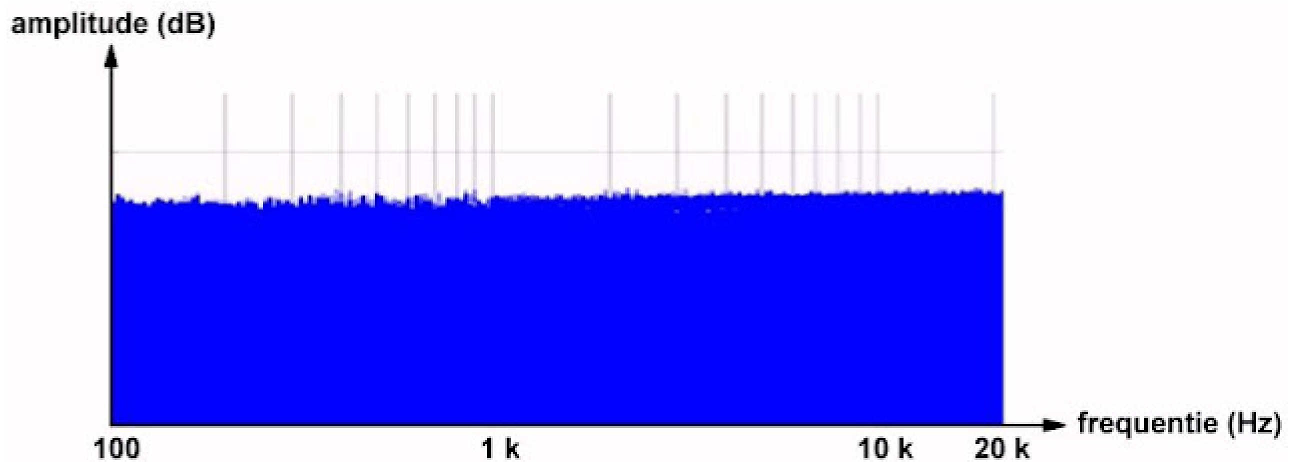
Transittijd ruis (transit-time noise)

Belangrijk bij hoge frequenties
Deze ruis treedt op als de transitietijd van een ladingsdrager vergelijkbaar wordt met de periode-duur van het signaal dat aan de halfgeleider wordt aangeboden. De transitietijd is de tijd die bijvoorbeeld een gat of een elektron nodig hebben om het materiaal van een halfgeleider te doorlopen. Er kan dan interferentie optreden tussen het amplitudeverloop van het signaal in functie van de tijd en de weg die de ladingsdrager door de halfgeleider in hetzelfde tijdinterval aflegt.

Recht evenredig met de frequentie
Deze ruis neemt ongeveer lineair toe als de signaalfrequentie stijgt en wordt een factor waarmee u rekening moet houden bij de verwerking van signalen in het microgolf bereik, dus bij signaalfrequenties van meer dan 300 MHz.

Witte ruis (white noise)

Definitie
Als u een wit ruissignaal gedurende een zeer lange tijd met een integrerende spectrumanalysator zou bestuderen, dan kunt u er zeker van zijn dat er een rechte lijn op het scherm verschijnt. Men zegt dat witte ruis een '*constante spectrale vermogensdistributie*' heeft of, populairder uitgedrukt, dat alle frequentiebandjes in even sterke mate in het signaal aanwezig zijn. Grafisch kan men de bandbreedte van witte ruis voorstellen door een horizontale lijn in een amplitude/frequentie-grafiek, zie de onderstaande afbeelding.
De naam '*witte ruis*' is uiteraard naar analogie van '*wit licht*' dat immers ook is samengesteld uit alle golflengten die het menselijk oog kan zien.



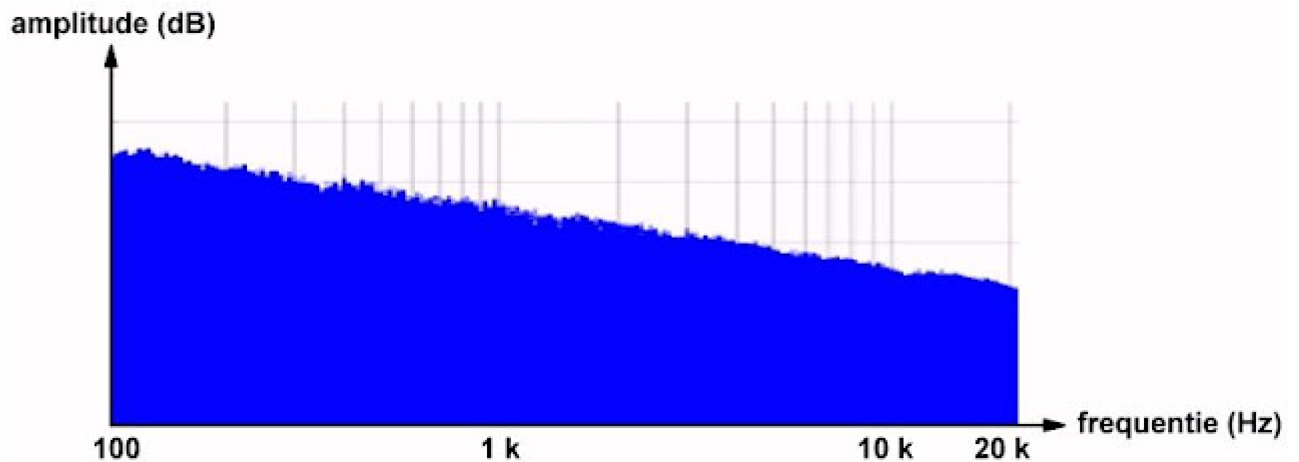
De amplitude/frequentie-karakteristiek van witte ruis.
(© 2012 Mick Ohrberg, edit 2022 door Jos Verstraten)

Witte ruis in de praktijk
Zuiver wiskundig bekeken wordt witte ruis beschreven als een willekeurig signaal met een oneindig grote bandbreedte. Dat is uiteraard uitsluitend een theoretisch model. In de praktijk wordt de bandbreedte van witte ruis begrensd door de bandbreedte van de bron die het signaal genereert, door de bandbreedte van de schakelingen die het signaal verwerken en door de bandbreedte van de meetapparatuur die de witte ruis observeert. Een signaal wordt witte ruis genoemd als blijkt dat de amplitude/frequentie-karakteristiek volledig vlak verloopt in de bandbreedte die relevant is voor de toepassing. In het audiogebied, waar witte ruis vaak wordt toegepast, moet de amplitude/frequentie-karakteristiek vlak verlopen in de frequentieband tussen 20 Hz en 20 kHz.

Toepassingen van witte ruis
Een dergelijk signaal is uiteraard een ideaal hulpmiddel voor het bestuderen van de akoestische eigenschappen van allerlei systemen. Maakt men witte ruis door middel van een zeer goede versterker en een even goede luidspreker met een zeer vlakke frequentiekarakteristiek hoorbaar in een auditorium, dan kan men door dit geluid ergens in de zaal met een meetmicrofoon op te vangen en dit signaal met een spectrumanalysator te ontleden, veel akoestische eigenschappen van de zaal te weten komen.
In de computer wetenschappen wordt witte ruis soms gebruikt voor het genereren van een reeks echt volledig willekeurige getallen. Dat is namelijk met behulp van software algoritmen niet mogelijk, het resultaat is altijd '*pseude-willekeurig*'.
Witte ruis generatoren worden in de alternatieve geneeskunde toegepast bij het behandelen van tinnitus en slapeloosheid. Tinnitus is een ziekte waarbij de patiënt vrijwel voortdurend last heeft van ruisende, piepende of fluitende geluiden. Het woord tinnitus is afgeleid van het Latijnse woord '*tinnire*' dat rinkelen betekent. Bij tinnitus hoort men dus geluiden die niet bestaan, maar die op de een of andere manier wordt gegenereerd in de oren of de hersenen.
Uit diverse vergelijkende proeven zou blijken dat auditieve blootstelling aan witte ruis in het audiobereik de cognitieve functies aanscherpt.

Roze ruis (pink noise, 1/f noise)

Definitie
De amplitude/frequentie-karakteristiek van roze ruis vertoont, uitgezet op een logaritmische frequentie-as, een lineaire daling met 10 dB per frequentie-decade. De spectrale vermogensdichtheid neemt, vergeleken met witte ruis, af met 3 dB per octaaf. De vermogensdichtheid is dus evenredig met 1/f. Om deze reden wordt roze ruis vaak '*1/f-ruis*' genoemd.



De amplitude/frequentie-karakteristiek van rose ruis.
(© 2012 Mick Ohrberg, edit 2022 door Jos Verstraten)

Wat is een octaaf?
Het begrip '*octaaf*' komt uit de muziektheorie. Een muziekinstrument kan noten produceren. Iedere noot heeft een specifieke frequentie en een specifieke benaming: C, D, E, F, G, A en B. Die noten zijn ook bekend als do-re-mi-fa-sol-la-ti. Die reeks van zeven noten herhaalt zich steeds weer, van de allerlaagste tonen tot de allerhoogste tonen die een instrument kan spelen. Die reeksen worden aangeduid met cijfers. De frequenties verdubbelen zich iedere keer. Als bijvoorbeeld een bepaalde A (A4) een frequentie van 440 Hz heeft dan zal de volgende A (A5) een frequentie van 880 Hz hebben en de vorige A (A3) een van 220 Hz. Al die noten vormen de toonladder. Het frequentie-interval tussen de eerste en de achtste noot in die toonladder heet een octaaf. Het woord octaaf is afkomstig van het Griekse woord '*okta*', dat acht betekent. De twee noten waartussen een octaaf ligt hebben dezelfde naam. Een octaaf ligt bijvoorbeeld tussen een C-noot en de eerstvolgende C-noot daarboven of daaronder.

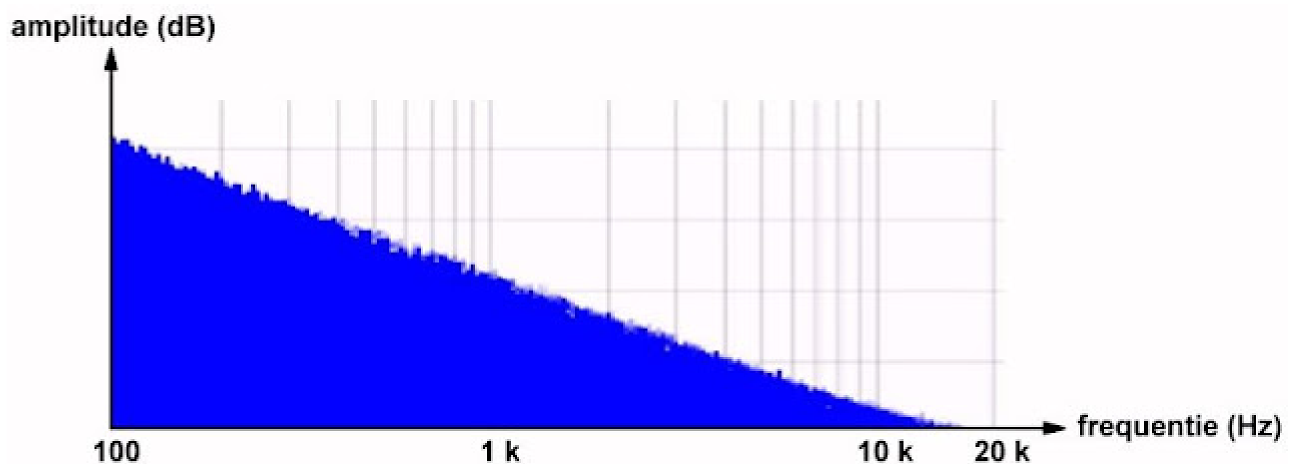
Wat is het nut van deze specifieke verzwakking?
Wij hebben reeds geschreven dat witte ruis vaak wordt gebruikt voor het opmeten van de weergave-karakteristiek van een ruimte of een audio-apparaat. Bij dit soort metingen gebruikt men een groot aantal filters om het te meten ruissignaal te ontleden in een heleboel kleine frequentiebandjes. Nadien gaat men meten hoeveel signaal er in ieder van die bandjes aanwezig is.
Het is echter zeer moeilijk doorlaatfilters te ontwerpen met verschillende centrale frequenties, maar met dezelfde bandbreedte. Het soort filters dat in de analoge elektronica wordt toegepast wordt gekenmerkt door een constante kwaliteitsfactor Q. Dit wil zeggen dat de bandbreedte stijgt met de centrale frequentie. Als men een wit ruissignaal analyseert door middel van een bank van constante Q-filters, zal men vaststellen dat het uitgangssignaal van de filters groter wordt als de centrale frequentie stijgt. Dat is logisch, want hoe hoger de centrale frequentie, hoe breder de doorlaatband van het filter en hoe meer frequenties uit het ruissignaal worden doorgelaten!
Men kan wiskundig berekenen dat een verdubbeling van de centrale frequentie een stijging van de uitgangsspanning met 3 dB tot gevolg heeft. De remedie is dus simpel: men moet het witte ruissignaal door een laagdoorlaatfilter sturen met een versterkingsdaling van 3 dB per octaaf! Een octaaf komt immers overeen met de afstand tussen een bepaalde frequentie en tweemaal die frequentie. Het filter moet dus voor iedere frequentieverdubbeling een verzwakking van 3 dB veroorzaken.
Rose ruis bevat dus veel meer lage frequenties dan hoge: het normale geluidsspectrum van 20 Hz tot 20.480 kHz omvat tien octaven en bijgevolg zal deze hoogste frequentie met 30 dB verzwakt zijn ten opzichte van de laagste frequentie die in de rose ruis aanwezig is.

Besluit
Rose ruis wordt afgeleid van witte ruis om op een goede manier geluidsspectrum-metingen te

kunnen uitvoeren met eenvoudige analoge bandfilters.

Bruine ruis (Brownian noise, brown noise, 1/f² noise)

Definitie
Bruine ruis wordt afgeleid van witte ruis door het signaal door een laagdoorlaatfilter te sturen dat het signaal met 6 dB per octaaf verzwakt. Over het volledig audiobereik van 20 Hz tot 20.480 kHz moet de witte ruis dus volgens een lineair verloop met maximaal 60 dB worden verzwakt. De vermogensdichtheid is omgekeerd evenredig met het kwadraat van de frequentie (1/f²). De vermogensdichtheid neemt dus af met een factor vier of 6 dB wanneer de frequentie verdubbelt (octaaf).



De amplitude/frequentie-karakteristiek van bruine ruis.
(© 2012 Mick Ohrberg, edit 2022 door Jos Verstraten)

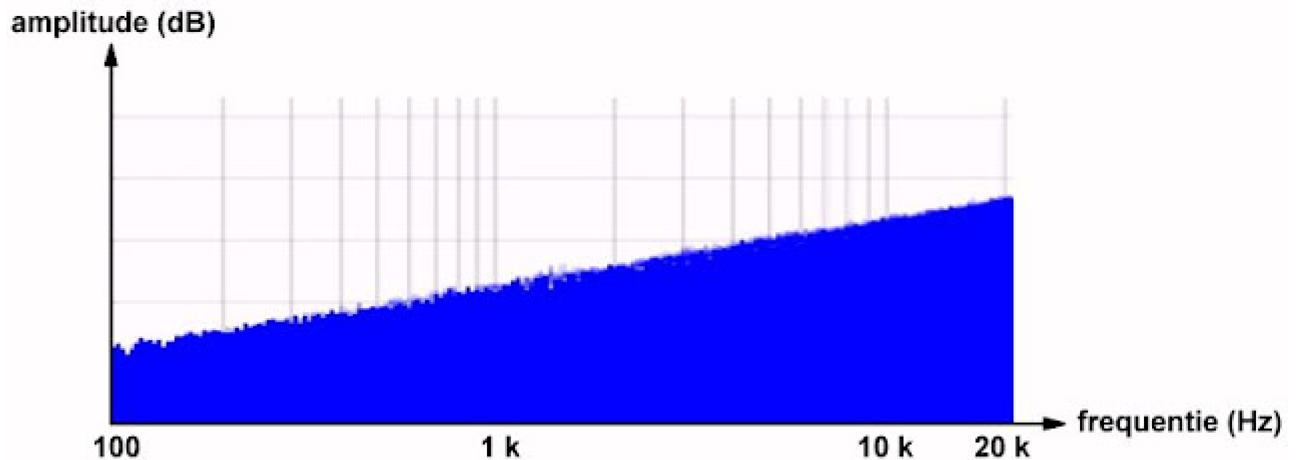
Naamsverwarring
In het Nederlands spreekt men van '*bruine ruis*', terwijl u in het Engels soms de term '*Brownian noise*' in plaats van '*brown noise*' zult tegenkomen. Deze term verwijst naar de Schotse botanicus Robert Brown, ontdekker van de '*Brownse moleculaire beweging*'. De Brownse beweging komt, wiskundig geanalyseerd, overeen met 1/f² ruis. Omdat alle overige soorten ruis naar een kleur werden genoemd en Brown in het Engels ook voor een kleur staat lag het voor de hand dat deze ruis ook naar een kleur zou worden vernoemd.

Toepassingen van bruine ruis
Behalve bij wetenschappelijk onderzoek wordt bruine ruis in de alternatieve hoek ingeschakeld voor allerlei levensverbeterende therapieën, bijvoorbeeld als achtergrond geluid bij mindfulness sessies en bij stressverlagende healings.
Ook bij het bestrijden van de effecten van continu hoorbare '*LaagFrequente Geluiden*' (LFG) schijnt het gebruik van bruine ruis als een soort van anti-geluid te helpen. Mensen die hinder hebben van LFG vertonen een scala aan medische en lichamelijke klachten, zoals slaapproblemen, vermoeidheid, hoofdpijn, benauwdheid, druk op de borst, druk op de oren, hartkloppingen, een gevoel van trillingen in het lichaam.

Blauwe ruis (blue noise)

Definitie
De vermogensdichtheid van blauwe ruis neemt toe met 3 dB per octaaf met toenemende frequentie over een bepaald frequentiebereik. Over het volledige audiobereik neemt de

amplitude dus toe met 30 dB.



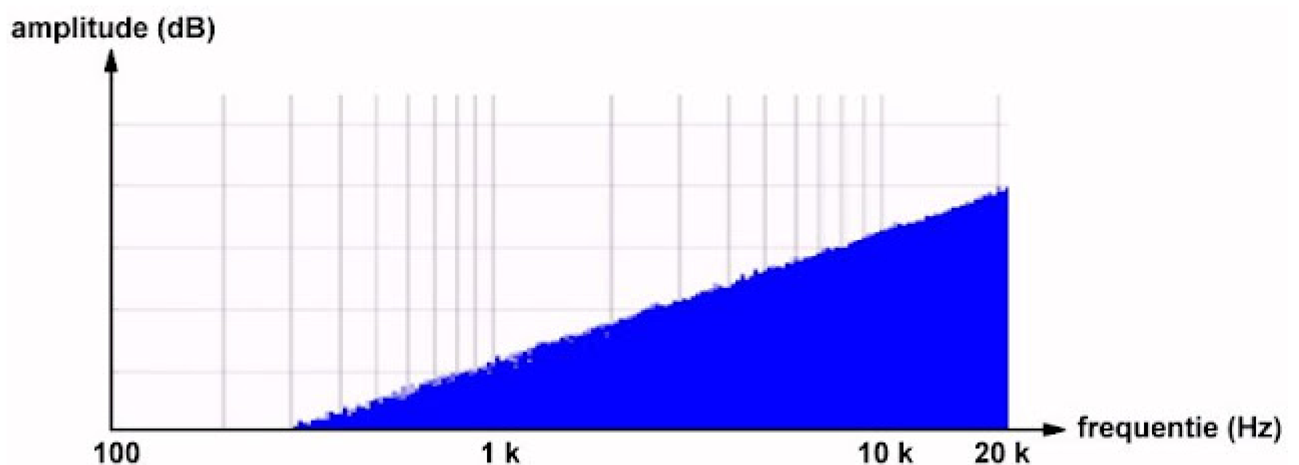
De amplitude/frequentie-karakteristiek van blauwe ruis.
(© 2012 Mick Ohrberg, edit 2022 door Jos Verstraten)

Merkwaardige overeenkomsten in de natuur
De cellen op het netvlies zijn gerangschikt in een patroon met een blauwe ruis verdeling, dat blijkbaar de beste resolutie oplevert.
Cherenkov-straling, die hoog in de atmosfeer voorkomt, is een natuurlijk voorkomend voorbeeld van bijna perfecte blauwe ruis.

Toepassingen
Blauwe ruis wordt gebruikt bij de productie van elektronische en filmmuziek, bijvoorbeeld voor het reproduceren van watergeluiden.

Paarse ruis (violet noise)

Definitie
De vermogensdichtheid van paarse ruis neemt toe met 6 dB per octaaf met toenemende frequentie over een bepaald frequentiebereik.



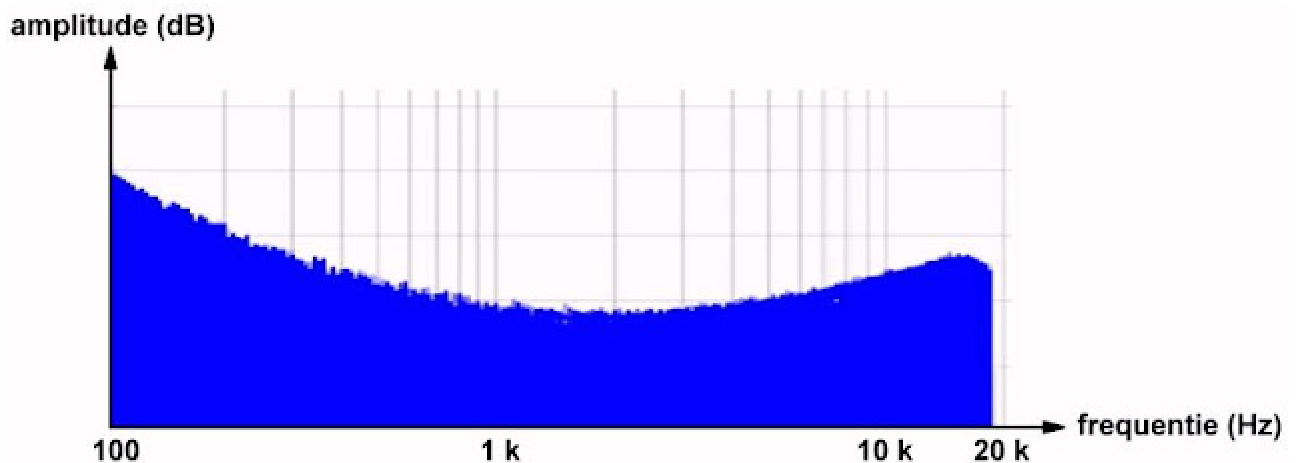
De amplitude/frequentie-karakteristiek van paarse ruis.
(© 2012 Mick Ohrberg, edit 2022 door Jos Verstraten)

Toepassing
Paarse ruis wordt toegepast in de geluidsreproductie om kwantiseringsfouten bij het

voorbereiden van digitale audio voor opname op audio-CD's te maskeren. Samples hebben op een audio-CD een resolutie van 16 bit. De originele opnames in de studio hebben echter vaak een veel hogere resolutie. Bij het omzetten van deze samples naar 16 bit ontstaan fouten die op de een of andere manier door het toevoegen van paarse ruis gemaskeerd kunnen worden. Deze techniek noemt men '*dithering*', maar het gaat te ver om in deze al zeer uitgebreide bespreking van het begrip 'ruis in de elektronica' hier dieper op in te gaan.

Grijze ruis (grey noise)

Definitie
Bij deze ruis wordt witte ruis door een speciaal filter gehaald, waardoor het eindresultaat lijkt op de gevoeligheidscurve van het menselijk gehoor. De menselijke luisteraar krijgt hierdoor de indruk dat alle frequenties in het signaal even luid klinken.



De amplitude/frequentie-karakteristiek van grijze ruis.
(© 2012 Mick Ohrberg, edit 2022 door Jos Verstraten)

Toepassingen
Grijze ruis wordt toegepast in allerlei psycho-akoestische onderzoeken naar de perceptie van geluid door verschillende groepen van mensen. In de medische wereld gebruiken medici het om tinnitus of hyperacusis te behandelen. Hyperacusis is Grieks voor '*ik hoor teveel*'. Mensen die dit hebben (naar schatting 3 % van de Nederlandse bevolking) ervaren gewone geluiden als hinderlijk, irritant of zelfs pijnlijk.